ÜBER DEN

HALLEFFEKT DES WISMUTS

BEI

HOHEN TEMPERATUREN.

INAUGURAL-DISSERTATION

VERFASST UND DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

KGL. BAYERISCHEN JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

VORGELEGT

AM 18. FEBRUAR 1905

VON

HEINRICH FREIHERR RAUSCH VON TRAUBENBERG

AUS

RITTERGUT JÖRDEN, RUSSLAND, ESTLAND.

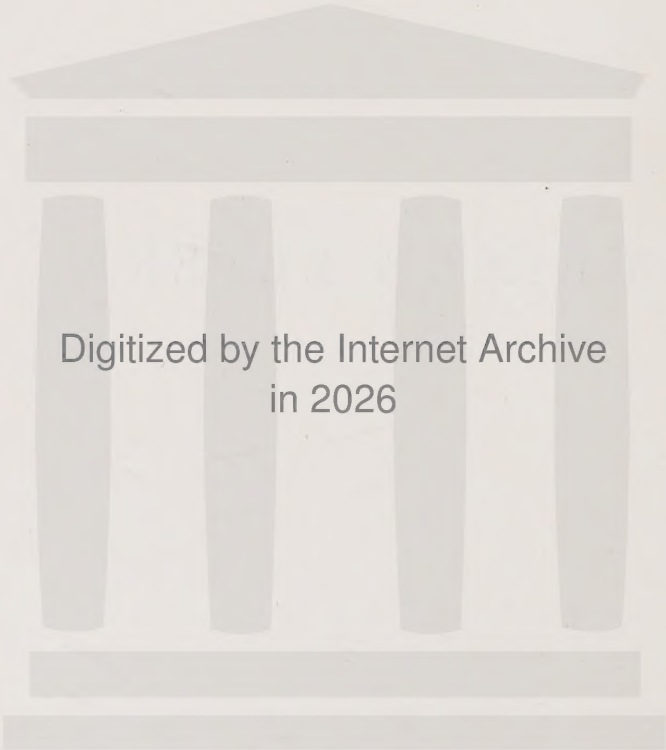
ACAD.
LAND.BAT.
BIBL.

WÜRZBURG

DRUCK DER KGL. UNIVERSITÄTS-DRUCKEREI VON H. STÜRTZ.

1905.

MEINEN ELTERN.


Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41507206_0083

Vorliegende Arbeit habe ich auf Veranlassung von Herrn Professor Dr. Wien unternommen und im Laufe der letzten drei Semester am physikalischen Institut der Universität Würzburg ausgeführt.

Es sei mir gestattet, meinem hochverehrten Lehrer Herrn Professor Dr. Wien für die Anregung und das überaus freundliche Interesse, das er stets meiner Arbeit entgegenbrachte, meinen allerwärmsten Dank auszusprechen. Auch Herrn Privatdozenten Dr. Harms möchte ich noch für manchen guten Rat danken.

Erster Teil.

Einleitung.

Weit zurück gehen in der Geschichte der Physik die Versuche, welche dartun sollten, ob die magnetischen Kräfte eine direkte Einwirkung auf die Elektrizität des Stromes selbst ausüben, oder ob diese Einwirkung lediglich ihren Ausdruck in den ponderomotorischen Kräften fände, die auf stromdurchflossene Leiter im magnetischen Felde ausgeübt werden. Nach vergeblichen Versuchen von Feilitzsch (1858), Mach (1870) und Gore (1874) gelang es bekanntlich E. H. Hall (1879), eine solche direkte Einwirkung nachzuweisen.

Um die Übersichtlichkeit zu erleichtern, sei es gleich hier gestattet, die bei diesem Versuch in Frage kommenden Grössen zu bezeichnen. Allen Grössen liegt das absolute elektromagnetische Masssystem zugrunde. Der die Platte in der Längsrichtung durchfliessende Strom, „der Hauptstrom", sei mit J, die an den zunächst äquipontialen Punkten unter der Einwirkung des magnetischen Feldes auftretende Potentialdifferenz E sei als Hallsche Spannung, der durch sie in einem Leitersystem hervorgerufene Strom als Hallscher Strom bezeichnet. Die magnetische Feldstärke sei $\mathfrak{H}$. Unter λ, β und δ haben wir die Länge, Breite und Dicke (in cm) der Platte zu verstehen. R $\left[\text{ergibt sich aus Formel I zu } L^{\frac{5}{2}} m^{-1/2}\right]$ sei die dem untersuchten Metall eigentümliche, von Hall als Rotationskoeffizient, Drehungsvermögen, bezeichnete Grösse.

Hall fand, dass diese Grösse R durch die Gleichung

$$R = \frac{E\,\delta}{\mathfrak{H}\,J} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (I)$$

ausgedrückt werden kann. Genauere Messungen zeigen nun allerdings, dass R keine keine lediglich von den Eigenschaften des verwendeten Materials abhängige Konstante ist, sondern durch Temperatur und Feldstärke wesentlich beeinflusst wird.

Die vielen Versuche, welche im Laufe der folgenden Zeit von verschiedenen Beobachtern angestellt wurden, liessen solche Einwirkungen von Temperatur und Feldstärke erkennen. Bei den magnetischen Materialien: Eisen, Stahl, Kobalt, Nickel konnte Hall eine Abnahme von R mit fallender Temperatur nachweisen, welche pro 1° Temperaturdifferenz eine Verkleinerung von R um 1 bis $^1/_3$% bewirkte, während bei den unmagnetischen Materialien ein kleines Wachsen von R mit abnehmender Temperatur zu konstatieren war[1]). Im Gegensatz hierzu fand Leduc[2]) eine Abnahme des Hallschen Effekts bei Wismut mit sinkender Temperatur, also einen positiven Temperatur-Koeffizienten für unmagnetische Materialien, der etwa gleich 844.10^{-5} war. Sehr sorgfältige Messungen über den Halleffekt haben v. Ettinghausen und Nernst im Jahre 1887 angestellt und dabei auch die Einflüsse von Temperatur und Feldstärke in den Rahmen ihrer Beobachtungen gezogen[3]). Die untersuchten Platten von verschiedener Herkunft zeigten verschiedenes Verhalten hinsichtlich ihres Temperaturkoeffizienten für R. Die Platte Nr. 1 zeigte eine Abnahme von R von —1% für eine Temperaturzunahme von 1°. Dieselbe Einwirkung zeigte Platte Nr. 2, welche in einem Intervall von 0 bis + 99 C einen negativen Temperaturkoeffizienten $\alpha = 0{,}01$ ergab. Platte Nr. 3 endlich zeigte positiven Temperaturkoeffizienten (—$^1/_4$% Zunahme pro 1° Temperatursteigerung) und bestätigte damit die von Leduc gemachte Beobachtung. Im Jahre 1891 unternahmen Herr Drude und Nernst[4]) eine Untersuchung, um den Einfluss der Temperatur (in sehr viel weiteren Grenzen als bisher) und des Aggregatzustandes auf den Halleffekt und die Widerstandsabnahme im Magnetfeld beim Wismut zu studieren.

Die hohen Temperaturen erzeugten sich die Verfasser durch Dampfbäder (Wasserdampf, Benzoesäureamylester 254° und Diphenylamin 310°), welche durch ein besonders konstruiertes Gebläse

[1]) Phil. Mag. XIX. 419—438.
[2]) Compt. Rend. 102 p. 358—361 (1886).
[3]) Exner, Repertorium 23, 1887.
[4]) Wied. Annalen. 42. 1891.

geheizt sich zwischen die Pole eines Magneten bringen liessen. Der Schmelzpunkt der verwendeten Wismutplatten lag bei 267°. Die Stromzuführungen zur Hallplatte bestanden aus Kupferdraht. Für die elektromotorische Kraft e des Hallstromes erhielten die Verfasser folgende relative Werte:

t =	20°	254°	23°
e =	1,000	0,418	1,005.

Wie man aus dieser Tabelle ersieht, waren die Verfasser nur 13° vom Schmelzpunkt entfernt; der Halleffekt ist bis auf weniger als die Hälfte seines Wertes gesunken.

Um die Entscheidung der Frage zu ermöglichen, ob das Hallsche Phänomen vorwiegend dem kristallinischen Charakter dieses Materials zuzuschreiben ist oder nicht, versuchen die Verfasser den Halleffekt beim geschmolzenen Wismut zu messen.

Ein kleines flachgedrücktes Fläschchen diente als Behältnis für das flüssige Wismut, eingeschmolzene Platindrähte sorgten für die Stromzuführung. Es ergab sich bei 310° ein Drehungsvermögen, welches zirka nur den $^1/_{100}$ Teil des bei Zimmertemperatur vorhandenen erreichte. Das nach Abkühlung erstarrte Wismut wurde nachher auf sein Drehungsvermögen hin untersucht und ergab folgende relative Werte:

t =	19°	243°	100°	14°
e =	1,000	0,23	1,23	1,16.

Erstens ergibt sich aus dieser Tabelle ein positiver Temperaturkoeffizient, im Intervall 100 bis 14°. Von 100° aufwärts haben wir jedoch einen negativen Temperaturkoeffizienten für R und zwar sinkt dieser im Intervall von 243 bis 310°, in welches die Verflüssigung des Wismuts fällt, von gut messbaren Werten auf annähernd 0 herab.

Aus diesen Versuchen kann man nicht ersehen, ob das Gebiet der schnellen Abnahme von R entweder sehr nahe beim Schmelzpunkt liegt, oder ob diese Abnahme plötzlich mit dem Wechsel des Aggregatzustandes eintritt. „Die Entscheidung zwischen beiden letzteren Möglichkeiten dürfte erhebliches Interesse bieten, war uns zu treffen aber bisher nicht möglich", schreiben die Verfasser. Zur Lösung dieser letzteren Frage einen Beitrag zu geben, und auch im übrigen Intervall (Zimmertemperatur — Schmelzpunkt) die Beziehung zwischen Rotationskoeffizient und Temperatur durch möglichst viel zugehörige Werte festzulegen, war die Aufgabe der

vorliegenden Arbeit. Ob der von den Verfassern festgestellte negative Temperaturkoeffizient der Widerstandsabnahme des Wismutes im Magnetfeld und das von ihnen neu bestätigte plötzliche Sinken des spezifischen Widerstandes dieses Metalles bei seinem Schmelzen, die Abnahme des Diamagnetismus mit der Temperatur mit dem Verhalten des Halleffekts in einem näheren Zusammenhang steht, lässt sich bei dem heutigen Stande der Theorie über diesen Gegenstand noch nicht entscheiden.

Im Jahre 1895 erschienen einige Arbeiten von A. Lebret, ausgeführt im Leydener Physikalischen Laboratorium, welche sich eingehend mit der Änderung des Halleffekts mit der Temperatur beschäftigen[1]). Lebret scheint auch der erste gewesen zu sein, welcher das Rotationsvermögen bei tiefen Temperaturen untersuchte. Die tiefen Temperaturen (—74°) wurden durch Bäder von fester Kohlensäure in Alkohol, die hohen durch Bäder von Glyzerin erzielt.

Ich gestatte mir einige seiner Werte wiederzugeben:

Wismut I (3000 C. G. S)

t	R
—74	1,256
—36	1,211
95	0,697
198	0,313
246,5	0,280.

Wismut II.

t	R
—69	0,866
—12	1,040
+21,5	1,002
105	0,634
242,5	0,175.

Diese Zahlen lassen ein durchaus verschiedenes Verhalten der beiden Platten erkennen (siehe auch die Kurven). Während Nr. 1 sich asymptotisch einem Maximum und Minimum nähert, hat II ein deutliches Maximum bei ca. —25°, und fällt von ca. +25° beinahe stetig mit steigender Temperatur ab. Von —69 bis ca. —25° haben wir hier positiven Temperaturkoeffizienten.

[1]) Dr. A. Lebret, Com. from. the Lab. of Phys. of the Un. Leyden No. 19.

Die Versuche von Lebret wurden später von E. van Everdingen[1]) in Leyden fortgesetzt und zwar unter Anwendung noch viel tieferer Temperaturen. Bei einer Feldstärke von 1000 C.G.S. Einheiten erhielt der Verfasser folgende Werte für R.

t.	R.
—182	62,2
+ 11,5	13,3
+100	7,28.

Die Platte zeigt im ganzen Intervall negativen Temperaturkoeffizient und scheint sich R mit steigender Temperatur asymptotisch einem Grenzwert zu nähern. 62,2 dürfte wohl der höchste für R beobachtete Wert sein. (Siehe auch die Kurve!)

In allerneuester Zeit ist noch von Zahn[2]) eine Arbeit ausgeführt worden, welche die Erforschung des Halleffekts und der mit ihm verwandten Effekte am gleichen Stück zur Aufgabe macht. Autor findet für die Temperaturkoeffizienten des Drehungsvermögens beim Wismut (in dem wohl etwas zu kleinen Intervall 15 bis 35° C gemessen).

$\alpha = -0{,}0028$ Platte I

$\alpha = -0{,}00074$ „ II. (Aus dem gleichen Stück geschnitten wie Platte I).

Die Zahnsche Arbeit war besonders mit Rücksicht auf die von Herrn P. Drude aufgestellte Elektronentheorie der Metalle[3]) unternommen worden, um einen zahlenmässigen Vergleich zwischen den dort abgeleiteten Grössen und den beobachteten zu ermöglichen. Leider war die Übereinstimmung eine sehr wenig befriedigende, überhaupt ist es jetzt nur sehr angenähert gelungen theoretische Erwägungen über den Halleffekt selbst und die mit ihm verwandten Erscheinungen in Einklang mit den beobachteten Resultaten zu bringen. Vergl. auch die Elektronentheorie von E. Riecke[4]).

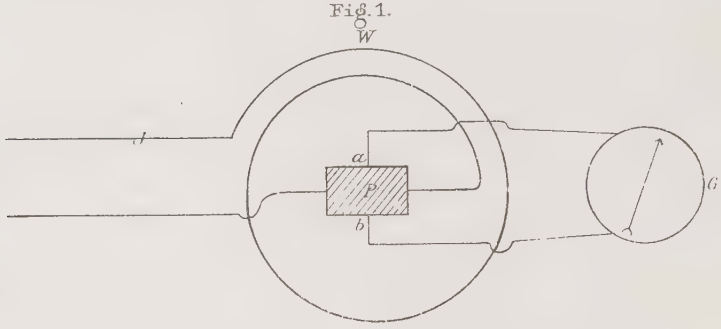
Die vorliegende Arbeit wurde wesentlich durch die von Herrn Th. Des Coudres eingeführte Anwendung von Wechselstrom bei Erzeugung des Halleffektes erleichtert[5]). Das Prinzip der Anordnung ist kurz folgendes:

---

1) Dr. E. v. Everdingen, Com. of Lab. Phys. Leyden No. 38.
2) Ann. d. Phys. Vierte Folge Bd. 14. 1904. p. 886.
3) Ann. d. Phys. 1. p. 566. 1900. 3. p. 369. 1900.
4) Wied. Ann. 66. p. 353 u. 543. 1898.
5) Th. Des Coudres, Phys. Zeitschr. II. 1900/1901. p. 586.

Ein Wechselstrom von bekannter effektiver Stromstärke J (siehe Fig. 1) durchlaufe nacheinander die Windungen W einer Spule und die in ihrem Innern befindliche Platte P. Verbinden wir sodann die beiden Elektroden a und b mit einem Galvanometer G, so zeigt dieses Gleichstrom an. Indem ja das von der Spule erzeugte Feld H und der Hauptstrom gleichzeitig ihren Sinn ändern, muss die in a und b auftretende Hallsche Potentialdifferenz ihre Richtung beibehalten. Wir können auch die in a und b auftretende Potentialdifferenz E etwa durch ein Normalelement kompensieren, E ist dann der zeitliche Spannungsmittelwert.

Fig. 1.



$$E = \frac{1}{T}\int_0^T e\,dt$$

wenn T die Periode des Wechselstromes bezeichnet. Unsere Formel I für den Rotationskoeffizienten R des Halleffektes würde somit völlig ihre für Gleichstrom gewonnene Form beibehalten, nur dass wir unter J und $\mathfrak{H}$ die effektiven Werte von Stromstärke und Feldstärke unter E den Spannungsmittelwert zu verstehen haben.

Bestimmen wir nun die effektive Feldstärke in ihrer Abhängigkeit von der Stromstärke, so würde, wenn wir unter C die Feldstärke am Ort der Platte verstehen, wenn ein Strom von 10 Amp. die Windungen des Magneten durchfliesst. (Um auf ein absolutes Mass zurückzuführen) sich die Formel für R auch schreiben lassen.

$$R = \frac{E\,\delta}{C\,J^2}$$

Diese Formel gilt unabhängig von Frequenz und Kurvenform des Hauptstromes J. Da ich aber $H = CJ$ aus der Induktion,

die das magnetische Wechselfeld $\mathfrak{H}$ in einer Spule von bekannter Windungsfläche hervorrief (siehe Seite 22), bestimmte, und in dieser Methode der Faktor n (Frequenz des Wechselstromes) eingeht, so musste die Frequenz von R bei allen Versuchen konstant = n gehalten werden (siehe Seite 19).

In der vorliegenden Arbeit wurde zur Messung der Hallschen Spannung E, nicht nur um von der Galvanometerempfindlichkeit unabhängig zu sein, sondern auch aus prinzipiellen Gründen ein Kompensationsverfahren angewendet. Nimmt man nämlich von den Rändern der Platte keinen Strom ab, so lässt sich in diesem Falle unter Annahme der Elektronenbewegung in Metallen leichter eine theoretische Behandlung des Halleffektes durchführen und ist auch unter der Voraussetzung, dass die Hallsche Spannung nicht abfliesst — in diesem Falle müssen die Strömungslinien auch im Magnetfeld zum Plattenrande Gerade sein — das Problem von Drude behandelt werden.

Gegenüber der Gleichstrommethode hat nun die Wechselstrommethode folgende ganz besondere Vorteile. Es ist nicht mehr nötig, zwei bei Feldstärke 0 völlig äquipotentiale Punkte a und b für die Hallelektroden abzusuchen, indem ja eine bei nicht äquipotentialer Lage von a und b ins Galvanometer laufende Stromkomponente des alternierenden Hauptstromes J auf dieses keinen Einfluss hat.

Von Ettinghausen und Nernst, Lebret, van Everdingen und andere vermieden das Absuchen der äquipotentialen Stellen durch Kompensation (teilweise durch Abzweigen vom Hauptstrom) der in den beiden Punkten a und b bei Feldstärke 0 auftretenden Spannung. Allerdings wird dieses Verfahren unter Berücksichtigung der von Lebret gefundenen Dissymmetrien des Halseffekts[1]), die offenbar teilweise ihre Ursache in Widerstandsänderungen des Wismuts im Magnetfelde haben, und dank der Inhomogenität der Platte für verschiedene Stellungen derselben verschiedene Werte zeigen können, sehr umständlich. Alle Widerstandsänderungen innerhalb der Platte, natürlich auch die durch Joulesche Wärme des Hauptstromes hervorgerufenen können ja

[1]) A. Lebret, Dissymmetrie of the Hall Effect in Wismuth for the opposite directions of the Magneticfield. Com. Lab. Phys. Leiden No. 19. 1895. Siehe auch van Everdingen (über denselben Gegenstand) Com. No. 61—72. Supplement No. 2. 1900—1901.

bei der Wechselstrommethode keine störenden Einflüsse auf den Hallstromkreis ausüben.

Aus diesem Grunde ist es auch möglich mit sehr viel grösseren Stromstärken zu arbeiten. Gerade auch dieser Umstand macht die Methode zur Untersuchung von Materialien mit kleinem Drehungsvermögen geeignet.

Der von Ettinghausen und Nernst entdeckte thermomagnetische Transversaleffekt kann ebenfalls nicht zu Störungen Anlass geben, da ein konstanter durch die Platte fliessender Wärmestrom in einem alternierenden Magnetfeld eine ebenfalls alternierende transversale Spannungsdifferenz hervorrufen muss. Nur der galvanomagnetische Transversaleffekt würde ebenso wie bei Gleichstrom auftreten können, jedoch lassen sich die durch die galvanomagnetische Erwärmung und Abkühlung bedingten Thermoeffekte durch Anwendung von Hallelektroden von gleichem Material wie die Platte und Kommutieren des Sinnes, indem der Hauptstrom nacheinander Hallplatte und Magnet durchlaufen muss, leicht vermeiden.

Auf das Bedenken, ob ein im alternierenden Magnetfeld beobachteter Wert von R gleich dem im konstanten Felde gewonnenen Werte ist, es könnte sich ja eine gewisse Trägheit des Halleffekts bemerkbar machen, ist Herr Des Coudres in seiner Arbeit auf Seite 588 eingegangen. Versuche mit Gleichstrom und Wechselstrom von 700 Wechseln pro Sekunde gaben völlig gleiche Werte für R.

Zweiter Teil.

A. Ausführung der Versuche.

1. Die Herstellung der Hallplatten.

Zur Untersuchung gelangte gegossenes kristallinisches Wismut. Das Material wurde von Merck in Darmstadt als Bismuthum purissimum bezogen und bestand aus grossen silberweissen kristallinischen Stücken.

Zunächst stellte ich nun aus gutem blasenfreien Spiegelglas Blättchen von der Grösse der später verwendeten Wismutplatten her. Ihre Dicke wurde mittelst Kalibers [1]) auf sieben verschiedenen Stellen gemessen und erwiesen sich die meisten als genügend plan. Die Platten zeigten folgende Dicken:

Nr. 1 = 0,132 (5) cm
„ 2 = 0,135 (2) „
„ 3 = 0,129 (5) „

Eine solche Glasplatte (Fig. 2) wurde mit 2 umgebogenen Kupferblechen K versehen, welche vorher auf ihrer ganzen Länge mittelst Lötkolben unter Anwendung von Lötwasser mit einer dünnen Wismutschicht bedeckt worden waren, das Wismut haftet dabei ebensogut wie Lötzinn am Kupfer, nur muss der Kolben

[1]) Wegen der grossen Unsicherheit, welche bis jetzt noch trotz Anwendung der reinsten Materialien der absoluten Grösse des Rotationskoeffizienten R anhaftet. (Platten aus dem gleichen Stücke geschnitten zeigen z. B. bei Zahn die Werte R = 5,80 u. 2,76) wurde von einer genaueren Bestimmung der in Formel I eingehenden von der Temperatur unabhängigen absoluten Grössen abgesehen und nur für möglichste Konstanz der in die relative Messung eingehenden Faktoren geachtet.

sehr heiss sein, da der Schmelzpunkt des Wismuts ein höherer ist, wie der des gewöhnlichen Lötzinns. Die so vorbereiteten Platten wurden dann sorgfältig gereinigt. Um die Platten mit einer dünnen Wismutschicht zu versehen, erwies sich nach einigem Probieren das folgende Verfahren als äusserst praktisch.

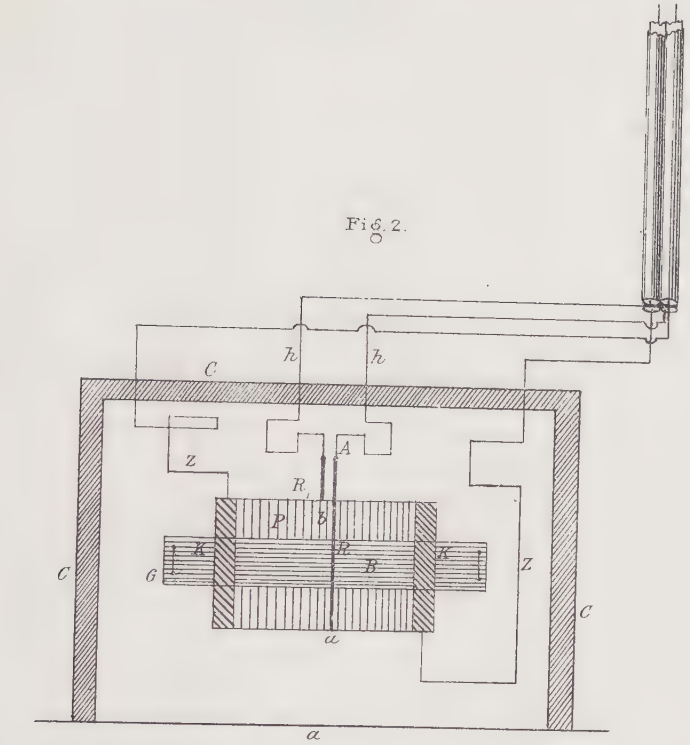
In eine aussen mit Eisenblech E begleitete Gipsform F. (Fig. 2 b) ist eine rechteckige Vertiefung eingeschnitten, welche genau die Grösse der Glasplatte hat. Auf diese Weise gelingt es, die Glasplatte möglichst gleichförmig und allmählich zu erwärmen. (Die Form wird mittelst Bunsenbrenners vorsichtig erhitzt).

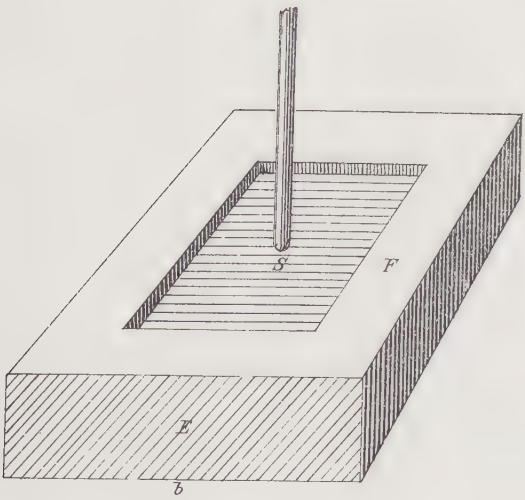
Bemerkt man, dass kleine auf der Glasplatte verteilte Wismutstückchen zu schmelzen anfangen, so hat die Platte die richtige Temperatur um einen Überguss von flüssigem Wismut, ohne ein Zerspringen befürchten zu müssen, zu vertragen. Das flüssige Wismut wird nun mittelst Glasspatel gleichförmig auf der Platte verteilt und dann ein kalter Messingstempel S rasch daraufgedrückt. Das überschüssige Wismut fliesst dadurch nach den Seiten ab und eine ziemlich dünne einigermassen plane Schicht bedeckt die Platte, die am Glase ebenso wie am Kupferstreifen völlig fest haftet. Das überschüssige Wismut wird nun an den Rändern mit Feile oder Laubsäge vorsichtig entfernt. Die Platte selbst wird mit immer feiner werdenden Feilen und Schmirgelleinen plan geschliffen, was man am besten dadurch erreicht, dass man die Platte beständig mittelst Kalibers misst und an den einzelnen Stellen nach Bedarf nachfeilt. Es wurden auf diese Weise drei Platten hergestellt (Nr. 1, Nr. 2 und Nr. 3), deren Wismutschichten im Mittel die folgenden Dicken hatten:

Nr. 1 = 0,030 (3) cm
„ 2 = 0,024 (2) „
„ 3 = 0,018 (8) „

Die so hergestellten Platten P mussten sich unverrückbar im Luftschlitz des Magneten befestigen lassen. Zu diesem Ende wurden sie auf einer starken Glimmerplatte (die zwecks grösserer Stabilität mit einer Einkantung von Kupferblech C versehen war) mittelst zwei Glimmerstreifen B befestigt. Die Glimmerplatte G hatte eine rechteckige Aussparung, in die die Wismuthplatten gerade hineinpassten und in welcher die beiden Bänder sie unverrückbar festhielten. Die Hauptstromzuleitungen Z wurden mehrere

Fig. 2.





Male durch die Glimmerplatte durchgefädelt und dann mit Wismut an die beiden Kupferstreifen K angelötet.

Vorversuche hatten gezeigt, dass es nicht möglich war die Hallsche Spannung direkt mittelst zweier Kupferdrähte in a und b abzunehmen, da die bei der Erwärmung der Platte, vielleicht auch durch den thermomagnetischen Transversaleffekt (s. S. 13) auftretenden thermoelektrischen Störungen zu bedeutend wurden. Es wurden deswegen besondere Hallelektroden R und R_1 aus Wismut verfertigt und diese bis zum Punkte A geführt und erst hier mit den Kupferdrähten h verschmolzen. Man hat so die Gewähr, dass die beiden Lötstellen zwischen Kupfer und Wismut auf einem Punkt gleicher Temperatur liegen und dadurch die entstehenden störenden thermoelektrischen Kräfte reduzirt werden. Die Wismut-Hallelektroden bestanden aus dünnen Glasröhren, in welche flüssiges Wismut eingesogen worden war, an den Punkten a und b waren die aus den Röhren hervorragenden Wismutenden mit der Platte verschmolzen; durch vorsichtiges Berühren mit dem Lötkolben lässt sich dies leicht erreichen. Die Glimmerplatte G lässt sich in einem am Magneten angeschraubten Halter von oben hineinschieben. Die Zuleitungen h und Z werden durch vier Glasröhren nach oben aus dem Bade herausgeführt.

Nach Versuchen von Ettinghausen und Nernst[1]) darf das Verhältnis von Breite zur Länge ($\beta : \lambda$) der Platten nicht ganz willkürlich gewählt werden, denn im Fall einer zu breiten und kurzen Platte würde sich ein Teil der Hallschen Potentialdifferenz vermittelst der Zu- und Ableitungsstellen des Primärstromes ausgleichen.

Für Wismut fanden die Verfasser das Verhältnis $\frac{\beta}{\lambda} = \frac{2}{3}$ völlig ausreichend, um den vollen Effekt zu erhalten, wie folgende Tabelle zeigt:

$\frac{\beta}{\lambda} = \frac{1}{1}$	R = 5,61
„ $= \frac{2}{3}$	„ = 6,28
„ $= \frac{1}{6}$	„ = 6,29

[1]) Exner's Repert. 23. p. 97 u. 98.

Bei den von mir verwendeten Platten hatte $\frac{\beta}{\lambda}$ folgende Werte:

$$\text{Nr. 1} \quad \frac{\beta}{\lambda} = \frac{1{,}95}{2{,}91}$$

$$\text{Nr. 2} \quad \frac{\beta}{\lambda} = \frac{2{,}18}{2{,}91}$$

$$\text{Nr. 3} \quad \frac{\beta}{\lambda} = \frac{1{,}81}{2{,}91}$$

Wie man sieht, hält Platte Nr. 2 dieses Verhältnis nicht ganz ein, wie man aber unter Verwendung der Ettinghausenschen und Nernstschen Zahlen ersehen kann, würde dies den Rotationskoeffizienten um nur nicht ganz 3% zu klein erscheinen lassen.

2. Die Messanordnung.

Fig. 3 zeigt uns die zur Erzeugung und Messung des Halleffektes dienenden Apparate.

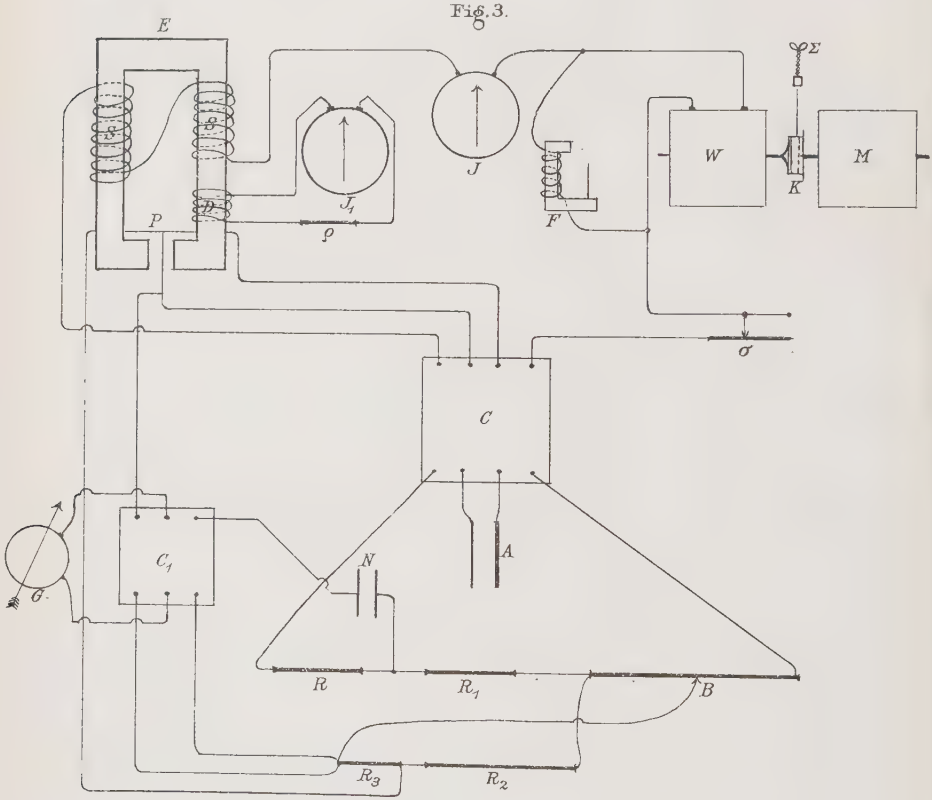
Der Wechselstrom, welcher die Spulen S des Magneten E und die in seinem Luftschlitz befindliche Hallplatte P durchfliesst, wurde von einem ca. 1 HP-Gleichstrom-Wechselstromumformer von Siemens & Halske geliefert; M und W stellen in der Figur schematisch den Gleichstrommotor und die vierpolige Wechselstrommaschine dar. Dieselben sind durch eine Zodel-Voithsche Kuppelung K miteinander verbunden.

Da Schwankungen in der Tourenzahl des Motors und die damit verbundenen Änderungen der Frequenz des Wechselstromes sich durch die vorhandenen Vorschaltwiderstände nicht fein genug regulieren liessen, wurde eine auf einem Ringe der Kuppelung schleifende und vom Messtisch aus mit Regulierschraube Σ einstellbare Bandbremse angewandt. Jede Änderung in der Frequenz des Wechselstromes liess sich durch einen Hartmann-Kempfschen Frequenzmesser F erkennen. (Derselbe besteht bekanntlich aus drei nur wenig gegeneinander verstimmten Federn, welche auf elektromagnetischem Wege durch den zu messenden Wechselstrom erregt werden. Regulirt man die Schwingungszahlen der Federn so, dass die mittlere bei der gewünschten Frequenz, die erste und letzte bei etwas zu grosser oder zu kleiner Frequenz durch Resonanz in besonders heftige Schwingungen geraten, so ist es auf

diese Weise möglich, jede kleine Änderung der Frequenz nachzuweisen).

Die Tourenzahl pro Minute der Wechselstrommaschine, welche dem Schwingen der mittleren Feder entsprach, betrug im Mittel aus 12 Beobachtungen 1223 Touren; die extremsten gemessenen Werte zeigten dabei Abweichungen von $\pm$ 1,5 % von diesem Mittelwert.

Fig. 3.



Die durch Magnet und Hallplatte fliessende Stromstärke wurde durch ein Hitzdraht-Ampèremeter J von Hartmann und Braun (Messbereich 0—10 Amp.) gemessen und betrug im Mittel bei den Versuchen ca. 1—3 Amp. Ein Schubrheostat σ gestattete die genauere Einstellung. Ein Hitzdraht-Voltmeter kontrollierte die Klemmspannung. Durch den Kommutator C war es möglich, den Sinn, in welchem der Wechselstrom nacheinander die Magnetspulen

und die Hallplatte durchläuft, zu ändern. Ohne die Anwesenheit von störenden Thermoströmen müsste man für beide Kommutatorstellungen gleiche Werte der Hallschen Spannung E erzielen; da sich die Thermoströme jedoch trotz heftigen Rührens des Ölbades an den Wismutelektroden nie völlig beseitigen liessen, wurde stets der Sinn des Halleffekts kommutiert und der Mittelwert der Einstellungen genommen. In der Figur stellt, wie schon gesagt, E den Magneten dar. Dieser, von Schuckert & Co. in Nürnberg bezogen, bestand aus bestem Lamellen-Eisen. Die einzelnen Stücke, aus denen er zusammengesetzt war, waren durch kräftige Messingschrauben miteinander verbunden, so dass sich jedenfalls ein guter magnetischer Schluss erzielen lassen musste. Um ihn zu kontrollieren, befand sich auf einem Schenkel eine Spule D in Verbindung mit einem Hitzdrahtampèremeter J_1 mit einem Messbereich von 0 bis 0,3 Amp., welches unter Zwischenschaltung eines geeigneten selbstinduktionsfreien Widerstandes ϱ stets den durch den Eisenkern hindurchgehenden magnetischen Fluss angab. Bei allen Versuchen wurde auf gleiche Einstellung von J_1 geachtet.

Die Erregerspulen S des Magneten bestanden aus ungeleimtem Holz und waren mit Seide umsponnenem Kupferdraht von 1,2 mm Durchmesser bewickelt. Der Eisenkern hatte einen Querschnitt von 5,1 × 3,9 mm. Der Luftschlitz eine Breite von 7 mm. Auf die Bestimmung der Feldstärke des Magneten werden wir im folgenden Paragraph noch näher zu sprechen kommen.

Die Hallsche Spannung E wurde mittelst des Kompensationsverfahrens mit der Spannung eines Akkumulators A verglichen; die Spannung des letzteren wieder auf ein Weston Normalelement N zurückgeführt.

In der Figur 3 bedeuten R R_1 R_2 R_3 Rheostatenwiderstände, B ist eine mit einem Konstantandraht versehene 1 m lange Brücke. Der Kommutator C kommutiert gleichzeitig mit dem Sinne des Halleffekts auch den Akkumulator; der Kommutator C_1 setzt entweder zur Eichung des Akkumulators oder zur Kompensation der Hallspannung das Galvanometer G mit der Messbrücke in Verbindung.

Da es manche Galvanometer gibt, welche auch Wechselstrom anzeigen, wurde ein Wechselstrom von derselben Frequenz wie er auch bei der Messung des Halleffektes in Anwendung kam und einer Stromstärke vom 8. $10.^{-5}$ Amp. durch das Galvanometer

geschickt. Dieser Strom hatte ungefähr dieselbe Grössenordnung wie ein derivierter Strom, welcher durch eine Verschiebung der Hallelektroden um 5 mm von einer Äquipotentiallinie im Galvanometerkreise entstanden wäre. Dieser Strom übte auf das Galvanometer keinen in Betrag kommenden Einfluss aus, wie die folgenden Zahlen beweisen.

$$N\,P = 501$$

$$\text{Wechselstrom vom } 8.\ 10.^{-5} = 502$$

Bezeichnen wir mit A die Spannung des Akkumulators, mit N die Spannung des Normalelements in Volt mit R_1 R_2 R_3 bekannte Rheostatenwiderstände in Ohm; mit a resp. a_1 die 0-Stellungen der Brücke in mm, wenn wir entweder die Spannung des Normalelements oder die Hallspannung mit dem Akkumulator vergleichen, so erhalten wir die nachstehende Formel für E, wenn wir unter λ den Reduktionsfaktor der Brücke (= Widerstand eines mm in Ohm) verstehen und berücksichtigen, dass

$R_2 + R_3$ gross gegen $a_1\,\lambda$ ist:

$$E = \frac{N\,a_1\,\lambda\,R_3}{(R_2 + R_3)\,(R_1 + a\,\lambda)} \quad \ldots\ldots \quad (II)$$

Der durch R_2 und R_3 gebildete Nebenschluss ist bei der Kompensation der Hallspannung erforderlich, da E von der Grössenordnung 10^{-5}, nicht direkt mit A vergleichbar ist.

Um ein Kriterium für die Genauigkeit und das gute Funktionieren der Brücke zu haben, wurde eine bekannte Spannung von $4{,}10 \times 10^{-5}$ Volt durch Abzweigen hergestellt und diese mittelst der Brücke kompensiert und nach (II) berechnet, es ergab sich der Wert $4{,}13 \times 10^{-5}$ Volt. Die Grössen von (I) hatten dabei folgende Zahlenwerte: N = 1,019 Volt R_1 = 26,02 Ω; R_2 = 1500 Ω; $R_3 = 2\,\Omega\,\lambda$ = 0,00241 Ω; a = 493 mm; a_1 = 344 mm.

3. Die Bestimmung der Feldstärke im Luftschlitz des Magneten.

Die Feldstärkenbestimmung geschah mit einer Spule von bekannter Windungsfläche (Normalspule). Bringen wir eine solche Spule in ein magnetisches Feld H, so ist die in ihr induzierte Spannung gegeben durch

$$N = f \frac{dH}{dt} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (III)$$

Formel (III) gilt auch für ein magnetisches Wechselfeld, wenn wir unter N und H die Momentanwerte von Spannung resp. Feldstärke verstehen.

Die effektive induzierte Spannung $\mathfrak{N}$ ist dann gegeben durch

$$\mathfrak{N} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T N^2\, dt} = f \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left(\frac{dH}{dt}\right)^2 dt}.$$

T bezeichnet die Dauer einer ganzen Periode. Die Auswertung des letzten Ausdrucks ergibt, wenn wir unter $n = \frac{1}{T}$ die Frequenz des Wechselstromes verstehen und berücksichtigen, dass der Effektivwert der Feldstärke $\mathfrak{H}$ = dem Maximalwerte $\mathfrak{H}_0$ dividiert durch $\sqrt{2}$ ist

$$\mathfrak{N} = f\, \mathfrak{H}\, 2\, \pi\, n$$

$$\mathfrak{H} = \frac{\mathfrak{N}}{2\, \pi\, n\, f} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (IV)$$

Die Spule von bekannter Windungsfläche bestand aus einem rechteckigen Schiefertäfelchen von den Dimensionen: Länge 4, Höhe 2,7, Dicke 0,35 cm, (die Spule musste diese kleinen Dimensionen haben, um sich genau an Stelle der Wismutplatte in den Luftspalt des Magneten bringen zu lassen), um welches ringsherum eine Nut von rechteckigem Querschnitt angefeilt war. In dieser Nut wurden 252,3 cm doppelt mit Seide umsponnener Kupferdraht in 3×7 Windungen möglichst glatt aufgewunden. Die einzelnen Lagen wurden nun möglichst genau mittelst eines Kalibers ausgemessen und ergab sich die Gesamtwindungsfläche zu 202.6 qcm.

Berechnet man die Windungsfläche aus der Anzahl der Windungen, Länge der Seiten des Schiefertäfelchens und der Drahtlänge, so ergibt sich die Windungsfläche zu 203,7 qcm. Im folgenden wird das Mittel aus diesen beiden Werten = 203 qcm benützt werden.

Das Schiefertäfelchen wurde ebenso wie die Wismutplatten auf einer Glimmerunterlage befestigt und liess sich ebenfalls in den am Magnet befestigten Halter hineinschieben.

Um den Effektivwert $\mathfrak{N}$ der in der Spule induzierten Spannung zu bestimmen, schlug ich folgendes Verfahren ein:

Durch Vergleich der Stromstärken, die eine bekannte effektive Wechselstromspannung bezw. die in der Spule induzierte effektive Spannung $\mathfrak{N}$ in einem Spiegeldynamometer hervorrufen, lässt sich $\mathfrak{N}$ bestimmen. Um die Messung zu vereinfachen, war die Methode so einzurichten, dass man von der Selbstinduktion, dem inneren Widerstand, Reduktionsfaktor Unsymmetrie des Dynamometers unabhängig ist und auch Selbstinduktion und Widerstand der Normalspule nicht in die Rechnung gehen. Da nur eine Wechselstromquelle (Umformer) von hoher Spannung, über 100 Volt, zur Verfügung stand, so musste man die bekannte Wechselstromspannung durch Abzweigen von einem genügend grossen Widerstand herstellen und das Dynamometer im Nebenschluss benützen.

Es seien in der nebenstehenden Figur (4a) R und w_1 selbstinduktionsfreie Rheostatenwiderstände, R ist viel grösser als w_1 (ca. 1000 : 6) von w_1 sei nach dem Dynamometer D, dem noch die im Luftschlitz des unerregten Magneten befindliche Normalspule f vorgeschaltet ist, abgezweigt; w_2 und p_2 sei der Ohmsche Widerstand bezw. Selbstinduktion dieses Zweiges (Spule + Dynamometer).

V bezeichne in der Figur ein Hitzdrahtvoltmeter, welches die Spannung V an den Enden von $R + w_1$ abzulesen gestattet, ϱ endlich sei ein Widerstand, welcher nur den Zweck hat, die Klemmspannung der Maschine herabzusetzen.

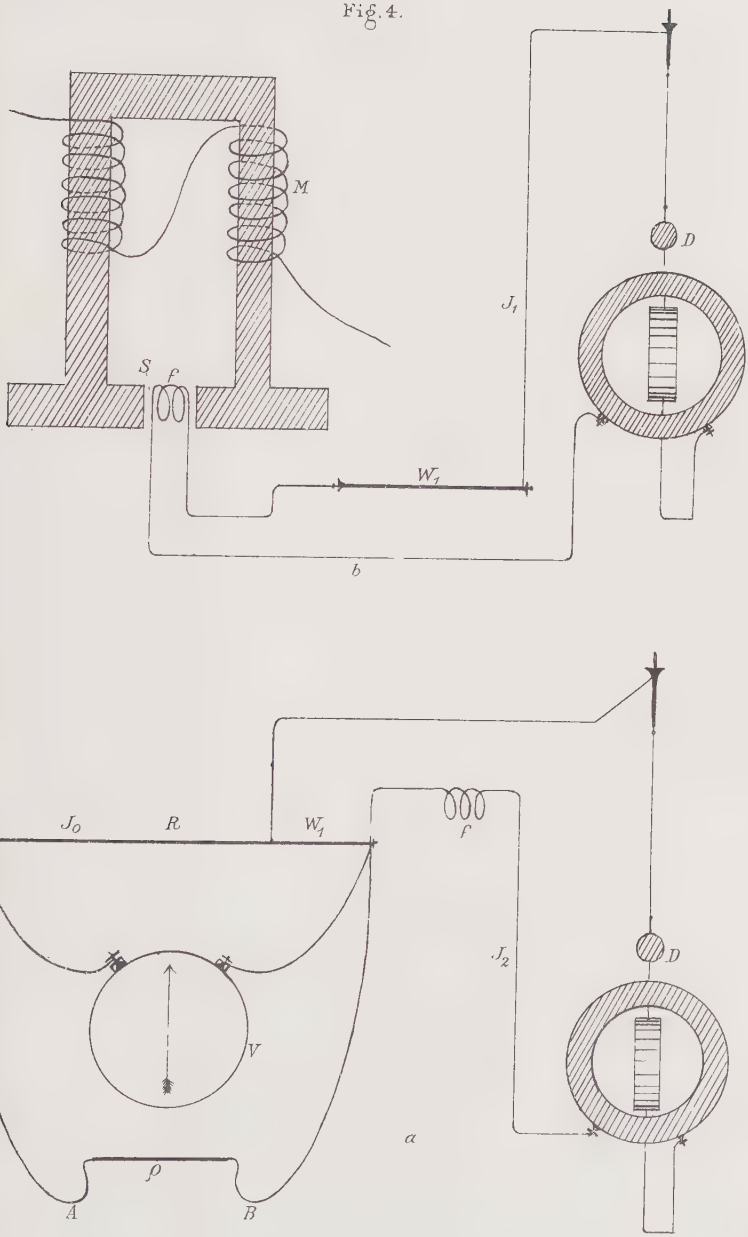
Ist nun J_0 die durch R fliessende effektive Stromstärke, so berechnet sich die durch den Dynamometerkreis fliessende Stromstärke J_2 nach der Formel

$$J_2 = \frac{J_0 \, w_1}{\sqrt{(w_2 + w_1)^2 + (2 \pi n p_2)^2}} = C \sqrt{\alpha''}$$

C ist der Reduktionsfaktor des Dynamometers, α'' sein Ausschlag.

Fig. 4b zeigt uns die Normalspule im Luftschlitz des erregten Magneten M in Verbindung mit dem Dynamometer. w_2 und p_2 möge in diesem Fall wieder Ohmscher Widerstand und Selbstinduktion vom Dynamometer + Normalspule bedeuten: um jedoch die Methode von Widerständen, Selbstinduktion und Dynamometerkonstanten unabhängig zu machen, müssen wir in diesem Falle (b) dem Dynamometer einen selbstinduktionsfreien Wider-

Fig. 4.



stand = w_1 verschalten, dann ist die durch das Dynamometer fliessende Stromstärke gegeben durch

$$J_1 = \frac{\mathfrak{R}}{\sqrt{(w_1 + w_2)^2 + (2\,p\,n\,p_2)^2}} = C\sqrt{\alpha'}$$

Bilden wir nun den Quotienten $\frac{J_1}{J_2}$, so fällt das ganze Glied $\sqrt{(w_1 + w_2)^2 + (2\,p\,n\,p_2)^2}$ heraus und wir erhalten

$$\mathfrak{R} = \frac{\sqrt{\alpha'}}{\sqrt{\alpha''}}\, J_0\, w_1$$

Man macht nun α^1 sehr nahe gleich α''.

Man könnte gegen die Methode einwenden, dass die Selbstinduktion von f im Falle (b) nicht dieselbe ist wie im Falle (a) — erregter und unerregter Magnet. Versuche jedoch hatten gezeigt, dass im Falle (a) die Selbstinduktion des Nebenschlusses nicht verändert wurde, ob die Spule im Luftschlitz oder weit entfernt von von Eisenmassen sich befand: die Selbstinduktion der Normalspule ist somit gegen die Selbstinduktion des Dynamometers zu vernachlässigen.

Setzen wir den Wert von $\mathfrak{R}$ in die Formel für $\mathfrak{H}$ ein, so ergibt sich

$$\mathfrak{H} = \frac{J_0\, w_1}{2\,\pi\,n\,f}\,\frac{\sqrt{\alpha'}}{\sqrt{\alpha''}} \quad \ldots\ldots\ldots \text{(V)}$$

Zahlenmässige Berechnung von $\mathfrak{H}$.

Wie Versuche gezeigt hatten, war es notwendig, den Versuch (b) wegen der Streuung des Magneten auszuführen, während sich der Magnet in dem später beschriebenen eisernen Gefäss befand, welches dazu diente, die Erhitzungsflüssigkeit aufzunehmen. Ausserdem wurde der Magnet häufig in der eisernen Wanne geschüttelt, um zu sehen, was etwaige Lagenänderungen des Magneten innerhalb der Wanne auf die im Luftschlitz gemessene Feldstärke $\mathfrak{H}$ ausüben könnten.

Um den Einfluss des Herausnehmens und Schütteln festzustellen, wurden vier verschiedene Messungen vorgenommen, das Dynamometer zeigte dabei bei Versuch b folgende Einstellung:

1. $\alpha_1 = 696$
2. $\alpha_1 = 704$
3. $\alpha_1 = 705$
4. $\alpha_1 = 680$

Mittel 696 mm.

Um zu untersuchen, welchen Einfluss Veränderungen in der Selbstinduktion der Normalspule f auf die Einstellungen des Dynamometers beim Versuche (a) ausüben, wurden zwei Messungen ausgeführt:

1. Normalspule im Luftschlitz $\alpha'' = 710$ mm
2. „ in Luft $\alpha'' = 718$ „
3. „ im Luftschlitz $\alpha'' = 717$ „

Der den Magneten erregende Hauptstrom hatte dabei bei dem Versuche (b) den Wert $A_1 = 1{,}0$ Amp., das Kontrollspulen-Ampèremeter (siehe Kapitel Messbrücke) zeigte eine Stromstärke $A_2 = 0{,}15$ Amp. an; auf diese Werte wurde auch stets bei der Messung des Halleffekts eingestellt. Φ ist die Klemmspannung der Wechselstrommaschine, V bezeichnet die an den Enden von R und w_1 mittelst Hitzdrahtampèremeter gemessene Spannung. Um R nicht zu erhitzen, wurde der Strom nur ganz kurze Zeit geschlossen.

a)

V = 79 Volt	α_1'' = 588,5 mm	
„ = 78 „	α_2'' = 584,0 „	
„ = 77,5 „	α_3'' = 584,0 „	
Mittel: 78,2 „	α'' = 585 „	

b)

$A_1 = 1{,}0$, $A_2 = 0{,}15$, $\Phi_1 = 127$	$\alpha_1' = 583$
$A_1 = 1{,}0$, $A_2 = 0{,}15$, $\Phi_2 = 126$	$\alpha_2' = 580$
$A_1 = 1{,}0$, $A_2 = 0{,}15$, $\Phi_3 = 125{,}8$	$\alpha_3' = 576$
Mittel: $A_1 = 1{,}0$, $A_2 = 0{,}15$, $\Phi = 126{,}3$	$\alpha' = 580$.

Mit Verwendung dieser Zahlen ergibt sich für $\mathfrak{H}$ nach Formel (V) folgender Wert in absolutem Masse, wobei wir für n mit Rücksicht der gefundenen Tourenzahl 1223 (der Maschinenrotor war 4polig) den Wert 40,8 für R und w_1 die Werte 939 bezw. 5,62 cbm und für f den Wert 203 qcm zu setzen haben, den Wert

$$\mathfrak{H} = 890 \text{ abs. Einheiten.}$$

Dieser Wert von $\mathfrak{H}$ bezieht sich auf die Halleffektskurve 1 und 2, während sich der Wert von $\mathfrak{H}$ bei Kurve 3 nicht genau angeben lässt, indem die Wickelung des Magneten durch Anbrennen des Ölbades nach Schluss des ersten Versuches leider zugrunde ging. Eine orientierende vorläufige Messung hatte bei diesem Versuch eine Feldstärke von c. 180 C. G. S. Einheiten ergeben. Man kann diesen Wert von $\mathfrak{H}$ benützen, um die Grösse des Rotationskoeffizienten R wenigstens der Grössenordnung nach bei dieser Platte anzugeben.

4. Die Erhitzungsvorrichtung der Hallplatten und die Temperaturmessung.

a) Erhitzungsvorrichtung.

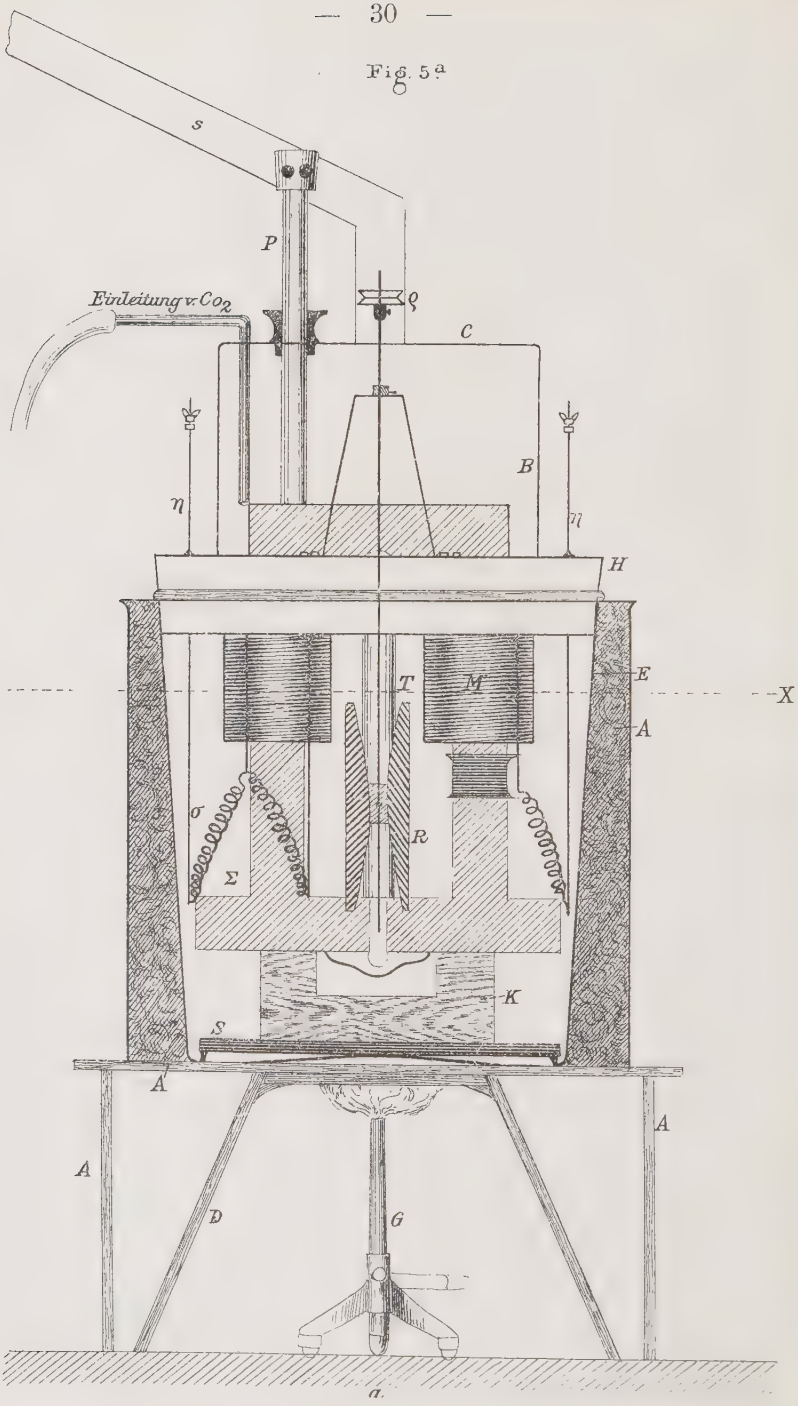
Da es nicht möglich war, die Wismutplatten allein im Luftschlitz zu erhitzen, ohne stets Inkonstanz und schlechte Temperaturverteilung befürchten zu müssen, ausserdem sich im 7 mm engen Luftschlitz des Magneten keine Erhitzungsvorrichtung anbringen liess, so wurde der ganze Magnet mit Spulen auf die gewünschte höhere Temperatur durch elektrische und Gasheizung gebracht.

Als Erhitzungsflüssigkeit in dem Temperaturbade wurde Vaselinöl verwendet. Es war nämlich die Anwendung einer isolierenden Flüssigkeit erforderlich, weil der Erregerstrom und der Hallstrom durch nicht isolierende Flüssigkeiten stets Nebenschlüsse erhalten hätten. Das Öl erwies sich auch bei 280° als vollständig isolierend. Fig. 5 zeigt uns die ganze Erhitzungsvorrichtung (a) im Durchschnitt und (b) im Querschnitt. E stellt in (5a) einen emaillierten Eisenblecheimer (Höhe 33 cm, lichter Durchm. 32 cm) dar, welcher auf einem eisernen Dreifuss D stehend rings mit einem Wärmeschutz von Asbestwolle und Asbestpappe A umgeben ist. Die Asbestpappe ist, wie auf der Figur ersichtlich, auch um den Gasbrenner G fortgesetzt, um die von ihm zugeführte Wärme mög-

lichst zusammenzuhalten[1]). Ungefähr bis zur Höhe χ wurde der Eimer mit Öl gefüllt. In dieses Öl ragen oben an einem Holzringe H (siehe auf 5b) befestigt, die Spiralenträger σ der elektrischen Heizvorrichtung herein. In Fig. 5a sind nur 5 solcher Träger mit den Heizspiralen Σ gezeichnet; es waren aber im ganzen 13 solcher Träger (s. 5b) peripherisch auf dem Holzringe angeschraubt. Die Befestigung der Heizspiralen zwischen den längeren und kürzeren Trägern lässt Fig. 5a erkennen. In Fig. 5b bezeichnen 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 die Einschraubstellen der langen Träger, während die übrigen Zellen die kurzen Träger andeuten. Die Träger 1, 2 und 8 gehen durch den Holzring durch und dienen (in Fig. 5a mit η bezeichnet, als Stromzuführung. Es war möglich, entweder alle Spiralen in Hintereinanderschaltung oder zur Hälfte parallel geschaltet zu verwenden. Im ersteren Falle wurde ein Hauptstrom von ca. 5 Amp., im zweiten Falle ein solcher von ca. 17 Amp. erzielt bei 110 Volt Betriebsspannung. Die Stromstärke konnte ausserdem durch einen vorgeschalteten Widerstand beliebig reguliert werden. Die Lage des Magneten M im Eimer ist in 5a ersichtlich. Der Magnet ist auf einen Holzklotz K angeschraubt, welcher seinerseits durch die Messingstreben S unverrückbar im Eimer festgehalten wird. R und T (siehe auch Fig. 5b) sind ein Flügel und ein Turbinenrührer, welche durch Schnurläufe ϱ durch zwei Gleichstrommotoren angetrieben werden. Die Turbine schafft dabei fortwährend Öl aus den unteren Schichten nach oben, während R (in der Figur zu hochgezeichnet, um den Lufttschlitz des Magneten erkennen zu lassen) für eine gute Durchrührung desselben in der Nähe der Wismutplatte sorgt. Als oberer Abschluss wird auf dem Holzring eine Blechkappe C mit dem Abzugsrohr s gesetzt, welche mit entsprechenden Öffnungen versehen ist, um das Platinthermometer P, die Zuleitungen zum Magneten und zur Hallplatte und die Rührerachsen hindurchgehen zu lassen. Sämtliche Zuleitungen waren in Glasröhren verlegt. Da leider nach Schluss von Hallkurve Nr. 3 das ganze Bad zu brennen anfing, das Öl ist bei der hohen Temperatur sehr leicht entzündlich, so wurde im weiteren Verlauf der Arbeit für möglichst gute Abdichtung des Topfes gesorgt. Ausserdem wurde auch stets ein

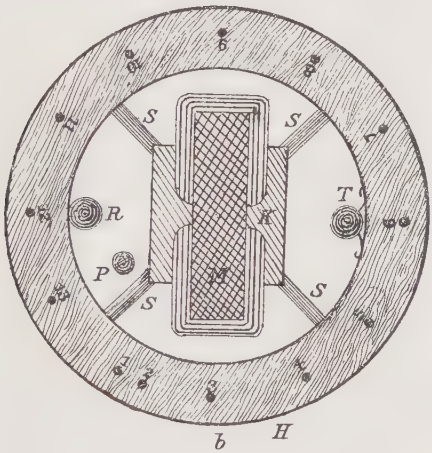
[1]) Später erwies sich eine einfache um den Topf herumgelegte Asbestpappe als genügender Schutz.

Fig. 5a



Kohlensäurestrom durch ein Röhrchen über das Öl eingeleitet. Die Anwendung des Gasbrenners G neben der elektrischen Heizung hatte sich als praktisch erwiesen, um den schon auf Seite 21 erwähnten, neben dem Hallstrom auftretenden störenden Thermostrom zu beseitigen.

Fig. 5b



b) Temperaturmessung.

Die Messung der erreichten Temperatur geschah, wie schon erwähnt, durch ein Platinthermometer P, dieses, dem Modell der Technischen Reichsanstalt nachgebildet, bestand aus einem + förmigen Glimmerrähmchen, auf welches bifilar ein dünner Platindraht von ca. 10 Ω Widerstand aufgewunden war. Dieses Rähmchen befand sich im unteren Teil einer unten zugeschmolzenen Glasröhre. Durch Glasröhren gegeneinander isolierte dicke Kupferdrähte dienten als Zuleitungen. Durch die Wheatstonsche Brückenanordnung wurde der Widerstand des Platindrahtes mit einem Manganinwiderstande verglichen. Die Brücke war, um grössere Verschiebungen zu erhalten, mit Vorschaltwiderständen versehen. Indem man das Platinthermometer auf verschiedene bekannte Temperaturen brachte und seinen jedesmaligen Widerstand abglich, liess sich die Brücke direkt in Temperaturgrade eichen. Die verschiedenen Temperaturen und entsprechenden Brückeneinstellungen wurden in einer Kurve vereinigt und die gesuchten Temperaturen aus dieser Kurve graphisch interpoliert.

Als bekannte Temperaturen, um das Platinthermometer zu eichen, benützte ich bei Zimmertemperatur Wasserbäder, Wasserdampf und die Dämpfe des siedenden Naphthalins und Diphenylamins. Die Siedepunkte des Naphthalins[1]) und Diphenylamins[2]) sind genügend genau mit zugehörigen Barometerständen bestimmt, um sie zwecks Herstellung bekannter Temperaturen zu verwenden. Bei allen Siedeflüssigkeiten wurde für kräftiges Sieden und gutem Wärmeschutz gesorgt. Es ergaben sich folgende Temperaturen und entsprechende Brückeneinstellungen.

Platinthermometer Nr. 1.

	Temp.	Brückeneinstellung.
1.	18,40	11,95
2.	99,7	24,15
3.	217	38,80
4.	301	47,43
5.	21,25	12,40

Da durch Anbrennen des Ölbades das Platinthermometer Nr. 1 zu grunde ging, wurde ein zweites Nr. 2 angefertigt und genau in derselben Weise geeicht. Die folgende Tabelle gibt für dieses die Temperaturen mit zugehörigen Brückeneinstellungen.

Platinthermometer Nr. 2.

1.	15,4	12,3
2.	99,5	25,0
3.	217	39,55
4.	301	48,15
5.	15,6	12,30.

Die beiden Kurven sind beinahe vollkommen parallele Gerade.

[1]) Landolts Tabellen der Physik u. Chemie.

[2]) Graebe, Liebigs Annalen der Chemie. Bd. 238, S. 362.

B. Die Messungen und Resultate.

a) Die Messungen.

Der Gang einer Messung gestaltete sich nun folgendermassen. Zunächst wird der Akkumulator A geschlossen, um möglichst konstante Spannung anzunehmen. Hierauf werden beide Rührer in Tätigkeit gesetzt und es wird längere Zeit gerührt, bis man sicher sein kann, dass alle Teile im Bade auch wirklich die gewünschte Temperatur angenommen haben. Dann die Temperatur abgelesen. Die Wechselstrommaschine in Gang gesetzt, mittelst der Bremse auf genau die gewünschte Frequenz (Schwingen der mittleren Feder) eingestellt, der Schieberrheostat σ so lange verschoben, bis an der Kontrollspule D das Hitzdrahtinstrument genau die gewünschte Stromstärke anzeigt; die Hallsche Spannung für die Kommutatorstellungen (C) I, II, I kompensiert und wieder die Temperatur abgelesen.

Wie ich mich mehrfach überzeugt habe, übte der Heizstrom auf die Temperatur- und Halleffektmessung keinerlei störende Wirkung aus, so dass man zur Vermeidung zu grosser Abkühlung des Bades die Heizstromleitung eingeschaltet lassen konnte. Der Strom wurde aber dann während einer Messung so schwach gestellt, dass die Temperatur während derselben annähernd konstant blieb.

Bei jeder Kurve wurden mindestens 20 Punkte aufgenommen, manche Teile in aufsteigendem und absteigendem Aste. Zur Kurve Nr. 3 Platte 2 ist zu bemerken, dass wegen der sehr viel kleineren Feldstärke die Spannung E erheblich kleiner war wie bei Kurve 1 und 2 (etwa nur $^1/_2$ bis $^1/_3$) und deshalb alle durch Thermoströme hervorgerufenen Störungen prozentisch bedeutend stärker in Rechnung gehen als wie bei 1 und 2. Ausserdem zeigten sich viel grössere Schwankungen des Hauptstromes, welcher im Mittel 3 Amp. betrug (9 mal grössere Erwärmung wie bei 1 und 2!). Kurve Nr. 3 macht deshalb nicht den Anspruch auf Genauigkeit wie 1 und 2. Ausserdem war die Feldstärke $\mathfrak{H}$ auch nur der Grössenordnung nach bekannt.

Bei den Kurven 1 und 2 bedeutet E den Wert der Hallschen Spannung, welche genau auf eine Stromstärke von 0,15 Amp. am Kontrollhitzdrahtamperemeter J_1 also auch auf konstanten Haupt-

strom J bezogen ist. Bei den starken Schwankungen in der Betriebsspannung der Wechselstrommaschine reichte der Widerstand σ nicht immer aus, um den Hauptstrom J so konstant zu erhalten, um immer auf $J_1 = 0{,}15$ Amp. einstellen zu können. Es wurde deshalb bestimmt, um wie viel sich die Hallsche Spannung prozentisch ändert, wenn beispielsweise J_1 um einen Skalenteil von 0,15 an gerechnet steigt oder sinkt. Indem man nun auf den gewünschten Wert 0,15 interpoliert, ist E und somit auch R stets auf die gleiche Stromstärke bezogen.

Die Widerstandserhöhung der Kontrollspule D mit wachsender Temperatur musste die Werte von E, wenn man nach wie vor auf 0,15 Amp. einstellt, zu hoch erscheinen lassen, es wurde deshalb diese Korrektion durch Vergrösserung des Vorschaltwiderstandes ϱ um einen geeigneten bekannten Wert empirisch bestimmt und bei Kurve 1 und 2 stets in Anrechnung gebracht.

Die maximalen Schwankungen des Hauptstromes betrugen bei 1 und 2 ca. 3 %.

In den folgenden Tabellen sind nun die Werte für E, R und t in der Reihenfolge, wie sie auch beobachtet wurden, zusammengestellt.

Wie schon früher bemerkt, wurde auf den absoluten Wert der Grösse R wegen der grossen Unsicherheit, welche bis jetzt noch aus unbekannten Gründen derselben anhaftet, weniger Gewicht gelegt, die in Formel I angegebenen absoluten Grössen δ J $\mathfrak{H}$ sind deswegen auch weniger genau bestimmt (J auf ca. 5 %[1]), H auf ca. 2,5 % und δ auf ca. 6 %) und sorgte ich hauptsächlich für möglichste Konstanz derselben während der einzelnen Messung.

Berechnet wurde die Grösse R nach Formel I bei Kurve Nr. 1 und Platte Nr. 3 unter Zugrundelegung der beobachteten Werte: $J = 10^{-1}$ abs. Ein., $\mathfrak{H} = 890$ abs. Ein., $\delta = 0{,}018(8)$ cm.

[1]) Die Stromstärke liess sich leider nicht sehr genau ablesen, weil das Messbereich des Ampèremeters bis 10 Amp. reichte.

Tabelle Nr. 1.

Kurve Nr. 1. Platte Nr. 3. $\mathfrak{H} = 890$ C g s.

Nr.	E abs.	R abs.	t Cels.	Bemerkungen.
1	27400	5,78	14,5	
2	19600	4,14	56,5	
3	16200	3,43	84	
4	13400	2,83	104	
5	10800	2,29	132(5)	
6	7680	1,62	119(5)	
7	5250	1,11	249	
8	5540	1,17	239	
9	6220	1,31	231	
10	5570	1,18	247	
11	5330	1,12	253	
12	5100	1,08	259	
13	4770	1,01	263	
14	5360	1,13	257	
15	5630	1,19	246(5)	
16	5610	1,19	250	
17	5280	1,12	256	
18	4790	1,01	262	
19	4630	0,98	266	
20	2990	0,63	269	
21	1960	0,41	270	Schmelzpunkt der Platte.
22	1170	0,25	270	

Punkt 20 der Kurve darf noch als sicher angenommen werden, während bei 21 und 22 das Rotationsvermögen so rapid abnimmt, dass eine sorgfältige Kompensation von E nicht mehr möglich ist, immerhin lassen 21 und 22 erkennen, dass R auch während dem Schmelzen Werte hat, die von 0 noch deutlich verschieden sind.

Tabelle Nr. 2.

Kurve Nr. 2. Platte Nr. 1.

$J = 10^{-1}$ abs. Einh.; $\mathfrak{H} = 890$ abs. Einh. $\delta = 0{,}030(3)$ cm.

Nr.	E abs.	R abs.	t Cels.	Bemerkungen.
1	15500	5,28	14,5	
2	15500	5,28	14,5	
3	12500	4,26	41,5	
4	10100	3,44	67,0	
5	8930	3,04	83,0	
6	7540	2,57	104	
7	6230	2,12	125	
8	4170	1,42	189	
9	3640	1,24	212(5)	
10	3460	1,18	223	
11	3260	1,11	239	
12	3090	1,05	249	
13	3060	1,04	255	
14	2860	0,97	259	
15	2980	1,02	259(5)	
16	2860	0,97	263	
17	2780	0,95	267	
18	2430	0,83	269	
19 20	2250	0,77	270	Schmelzpunkt der Platte.

Bei dieser Kurve sind Messung 19 und 20 (sie ergaben bei konstanter Temperatur denselben Wert für R (noch als sicher anzusehen. Leider schmolz eine der Hallelektroden zuerst ab, so dass sich die ganz kleinen Werte von R wie bei Kurve Nr. 1 (Messung 21 und 22) nicht mehr beobachten liessen.

Zum Schluss füge ich noch Kurve Nr. 3 bei, welche übrigens nur als ein Vorversuch anzusehen ist, offenbar muss wohl, wie schon früher erwähnt, eine Störung vorhanden gewesen sein, die die allzugrossen Unregelmässigkeiten rechtfertigt. Die Kurve wurde auch nur der Arbeit beigefügt, weil der dem Schmelzpunkt sehr nahe liegende Teil offenbar ein etwas abweichendes Verhalten in bezug auf Kurve 1 und 2 zeigt und deshalb vielleicht Interesse beanspruchen könnte. (Der Berechnung von R wurden die Werte $J = 3.10^{-1}$ abs. Einh., $\mathfrak{H} = 180$ abs. Einh. und $\delta = 0.24(2)$ cm zu Grunde gelegt.)

Tabelle Nr. 3.

Kurve Nr. 3. Platte Nr. 2. $\mathfrak{H}$ = ca. 180 Einh.

Nr.	E abs. corr.	t Cels.	R.	Bemerkungen.
1	1930	246	0,87	
2	2030	232	0,91	
3	2400	221	1,08	
4	2570	210	1,16	
5	3220	191	1,44	
6	3870	170	1,74	
7	3770	167	1,70	
8	5150	115	2,30	} Störung.
9	5180	110	2,32	
10	5310	88	2,38	
11	5320	83,5	2,38	
12	7800	37,5	3,50	
13	7940	36,5	3,56	
14	7890	36,5	3,53	
15	8750	23,5	3,92	Beginn des absteigenden Astes.
16	5230	91	2,34	
17	3720	122	1,67	
18	3700	148	1,66	
19	3420	165,5	1,54	
20	2940	184	1,32	
21	2840	199	1,27	
22	2490	217	1,11	
23	2190	244	0,98	
24	1990	259	0,89	
25	1680	258	0,75	} 0,72 Mittel.
26	1530	258	0,69	
27	1550	258	0,70	
28	1700	258	0,76	
29	1590	258	0,71	
30	1580	261	0,71	
31	2410	215	1,08	
32	2460	230	1,10	
33	2300	242	1,03	
34	2300	242	1,03	
35	2240	248	1,00	
36	2180	256	0,98	
37	2010	260	0,90	
38	1540	263	0,69	
39	1460	265	0,66	
40	1380	267	0,62	
41	813	270	0,36	Schmelzpunkt der Platte.

b) Vergleich der gefundenen Kurven untereinander und mit den von anderen Beobachtern gefundenen Resultaten.

Die zugehörigen Werte von R und t findet man in den am Schlusse der Arbeit befindlichen Kurven vereinigt. Um die Kurven nicht zu flach erscheinen zu lassen, multiplizierte ich die Werte von R mit 50.

Bei Platte Nr. 3 (Kurve Nr. 1) wurde das Drehungsvermögen zunächst mit steigender Temperatur bis 263° verfolgt, dann liess ich wieder bis 247° abkühlen, um schliesslich unter stets steigender Temperatur die Platte durchzuschmelzen.

Platte Nr. 1 (Kurve Nr. 2) wurde nur bei ansteigender Temperatur untersucht.

Bei genau 270° waren alle meine Platten geschmolzen, bei Kurve 1 (sie endet bei Punkt a) liessen sich noch sehr kleine Werte von R wenigstens der Grössenanordnung nach beobachten; der kleinste Wert bei Kurve 2 liegt bei b, hier schmolz, wie schon bemerkt, leider zuerst eine Hallelektrode, so dass weitere Beobachtungen von R nicht mehr möglich waren; immerhin tritt der sehr deutliche Abfall von R in die Nähe des Schmelzpunktes deutlich zutage.

Wie man sieht, sind bei Kurve Nr. 1 und 2 die Abweichungen der einzelnen Messungen recht gering (maximale Abweichung vom Mittelwert bei hoher Temperatur ca. 5%). Da bei Kure Nr. 3 die maximalen Abweichungen sehr gross waren, wurde darauf verzichtet, die Punkte durch eine Kurve zu verbinden. Der Gang der Beobachtungen war der, dass die Platte zunächst bis 246° erhitzt wurde, dann der Halleffekt unter ständiger Abkühlung der Platte gemessen wurde und zwar bis 24° (die einzelnen auf diesem absteigenden Ast der Kurve erhaltenen Punkte sind durch Kreuze bezeichnet). Dann wurde die Platte wieder bis 261° erwärmt (die Kreise). Hier zeigte sich zum ersten Mal ein schnelles Abfallen von R bei 260°, es wurde dann wieder abgekühlt bis 215°, dann wieder erwärmt (Punkte, Kreuz im Kreis) und zwar bis 270°, bei welcher Temperatur die Platte durchschmolz. Wieder zeigte sich bei 260° ein plötzlicher steiler Abfall von R. Ich glaube annehmen zu können, dass sich diese Abweichung im Vergleich mit Kurve 1 und 2 nicht lediglich auf die Versuchsfehler zurückführen lässt.

Wahrscheinlich müsste sich throretisch ein scharfer Knick beim Schmelzpunkt folgern lassen, da ja beim Schmelzpunkt eine kristallinische Substanz plötzlich in die amorphe Modifikation übergeht (vorausgesetzt natürlich, dass die Grösse des Drehungsvermögens von der Metallstruktur beeinflusst wird). Praktisch erfolgt jedoch das Schmelzen eines ausgedehnten Körpers nie völlig gleichzeitig auf allen seinen Teilen, was dann ein allmählicheres Heruntergehen von R in der Nähe des Schmelzpunktes zur Folge hätte. Da ausserdem noch nicht genügend festgestellt ist, in wie weit ganz geringe (der chemischen Analyse nicht mehr zugängliche) Verunreinigungen des Materials die Grösse von R modifizieren (offenbar weit mehr wie beim elektrischen Widerstande), so wäre es auch denkbar, das Fehlen eines scharfen Knickes dem Einflusse solcher Verunreinigungen zuzuschreiben, immerhin geht aus den vorliegenden Kurven deutlich hervor, dass die Abnahme von R an der Stelle des Schmelzpunktes selbst eine ausserordentlich viel stärkere ist wie dicht davor.

Gehen wir nun daran, die von mir gefundenen Resultate mit denen anderer Beobachter an Hand der Kurventafel 3 zu vergleichen.

Kurve 1, 2 und 3 sind die von mir beobachteten Kurven (Kurve 3 stellt allerdings nur ihren vermeintlichen Lauf dar). Kurve 4 und 5 wurden von Lebret für Wismutplatten erhalten (siehe Einleitung). Kurve 4 schliesst sich besonders im höheren Intervall ziemlich gut meinen Beobachtungen an. Kurve 5 zeigt jedoch schon deutliche Abweichung, besonders das Maximum bei ca. 30° ist sehr eigentümlich; die Platte hat, wie schon erwähnt, zunächst positiven, dann negativen Temperaturkoeffizienten, auch nähert sie sich im Gegensatz mit Kurve 4, die offenbar asymptotisch einem Grenzwerte zustrebt, weit schneller dem Nullwerden von R.

Kurve 6 stellt die von v. Everdingen gefundene Abhängigkeit zwischen Rotationsvermögen und Temperatur dar, sie schliesst sich im untersuchten Intervall gut meinen Beobachtungen an; auch lässt sie (siehe Tabelle Seite 11) bis —180° noch kein Maximum erkennen.

Kurve 7 zeigt uns das Rotationsvermögen der von Ettinghausen und Nernst untersuchten Wismutplatte Nr. 2 unter dem